



ニンニクリン茎の自発休眠、他発休眠および呼吸速度に及ぼす収穫後温度の影響

著者	山崎 博子, 庭田 英子, 矢野 孝喜, 長菅 香織, 山崎 篤
雑誌名	東北農業研究センター研究報告
巻	111
ページ	17-27
発行年	2010-01-01
URL	http://doi.org/10.24514/00001236

doi: 10.24514/00001236

ニンニクリン茎の自発休眠、他発休眠および呼吸速度に及ぼす 収穫後温度の影響

山崎 博子^{*1)}・庭田 英子^{*2)}・矢野 孝喜^{*1)}・長菅 香織^{*1)}
山崎 篤^{*1)}

抄 録：薬剤に依存しないニンニクの品質保持技術の開発に資する基礎的知見を得るため、ニンニク「福地ホワイト」りん茎の自発休眠、他発休眠および呼吸速度に及ぼす収穫後の温度の影響を調査した。りん茎の自発休眠は収穫時にすでに覚醒の途上にあり、収穫後の3週間の強制乾燥処理は覚醒をさらに促進した。自発休眠に及ぼす温度の影響（収穫後3週間、 -0.5°C ～ 35°C ）を調査した結果、 -0.5°C および 15°C 条件は自発休眠の覚醒を遅らせた。一方、 25°C 以上の条件は自発休眠の覚醒を促進し、その効果は 35°C 条件で最も高かった。他発休眠に及ぼす温度の影響（強制乾燥後9週間、 -2.5°C ～ 35°C ）を調査した結果、芽は 15°C 、根は 10°C 条件で最も伸長した。芽、根の伸長はこれらの温度より低温および高温になるほど強く抑制され、 -2.5°C および 35°C 条件ではほぼ完全に停止した。貯蔵中のりん茎の呼吸速度は、 20°C ～ 30°C の範囲では温度上昇とともに低下し、呼吸速度は涼温（ 10°C ～ 20°C ）より高温条件（ 25°C ～ 35°C ）で低かった。このような特異な呼吸特性は収穫後約3週間の間に獲得された。以上の結果から、収穫直後に行うニンニクの乾燥条件としては、自発休眠の維持の観点から、産地における現行条件（約 35°C ）より低い、 25°C ～ 30°C 条件が望ましく、貯蔵条件としては、自発休眠と他発休眠の両方に対して高い維持効果をもつ氷点下条件が望ましいと考えられた。

キーワード：ニンニク、自発休眠、他発休眠、呼吸、温度、貯蔵、乾燥

Effects of Temperature During Postharvest Period on the Endodormancy, Ecodormancy and Respiration Rate of Garlic Bulbs : Hiroko YAMAZAKI^{*1)}, Eiko NIWATA^{*2)}, Takayoshi YANO^{*1)}, Kaori NAGASUGA^{*1)} and Atsushi YAMASAKI^{*1)}

Abstract : The effects of temperature during the postharvest period on endodormancy, ecodormancy and respiration rate of garlic 'Fukuchi White' bulbs were investigated to clarify the bulbs basic characteristics, which will be useful for the development of a chemical-free postharvest technology. Bulbs at harvest were already starting to awaken from endodormancy. Three-week forced curing after harvest accelerated this awakening. When bulbs were exposed to various temperatures (-0.5°C ～ 35°C) for 3 weeks just after harvest, exposure to -0.5°C and 15°C retarded awakening endodormancy, while exposure to 25°C , 30°C or 35°C accelerated it. Exposure to 35°C accelerated it most severely. The bulbs stored at various temperatures (-2.5°C ～ 35°C) for 9 weeks after the 3-week forced curing developed sprouts and roots most easily in storage at 15°C and 10°C , respectively. The further the storage temperature was from 15°C and 10°C , the less the bulbs developed sprouts and roots, respectively. Sprout and root growth in 9-week storage at -2.5°C and 35°C was inhibited almost completely. The respiration rate of stored bulbs declined with the rise in temperature in the range from 20°C to 30°C . The respiration rate in storage at high temperature (25°C ～ 35°C) was lower than that in storage at cool temperature (10°C ～ 20°C). Garlic bulbs obtained this unique respiration characteristic for about 3 weeks after harvest. From the results of this study, it can be presumed that curing between 25°C and 30°C is more suitable than that at about 35°C , the existing curing temperature of garlic bulbs in Aomori prefecture, from the viewpoint of maintenance of

* 1) 東北農業研究センター (National Agricultural Research Center for Tohoku Region, Shimokuriyagawa, Morioka, Iwate 020-0123, JAPAN)

* 2) 青森県産業技術センター野菜研究所 (Local Independent Administrative Institution Aomori Prefectural Industrial Technology Research Center, Vegetable Research Institute, Rokunohe, Kamikita-gun, Aomori 033-0071, JAPAN)
2009年9月4日受付、2009年12月3日受理

endodormancy. It can also be presumed that subzero temperature is suitable for long-term storage of garlic bulbs because it is effective for maintaining endodormancy as well as ecodormancy.

Key Words : Ecodormancy, Endodormancy, Garlic, Respiration, Temperature, Storage, Curing

I 緒 言

ニンニクは年1回、7月上旬に収穫したりん茎を貯蔵し、これを計画的に出荷することで周年供給が行われる。植物生長調整剤のマレイン酸ヒドラジドコリン塩は、ニンニク、タマネギ、ジャガイモなどに対して萌芽抑制効果を有し (El-Oksh *et al.* 1971、Isenberg *et al.* 1974)、国産ニンニクの約8割を生産する青森県では、周年出荷用ニンニクに広く利用されてきた。最長1年となるニンニくりん茎の室温貯蔵は、収穫前の株に同剤を散布することにより可能となっていた。しかし、2002年に同剤の農薬登録が失効したことにより、周年供給の維持のため、薬剤に依存しない新たな品質保持技術の確立が必要となった。

Lang *et al.* (1987) は、植物の休眠を「分裂組織を含むあらゆる器官における可視的な生長の一時的な停止」と定義し、休眠を自発休眠 (endodormancy)、相関休眠 (paradormancy)、他発休眠 (ecodormancy) の3つに分類している。自発休眠は休眠器官そのものの生理的な要因に、また、相関休眠は休眠器官以外の生理的な要因に、そして、他発休眠は環境要因によって支配される。収穫直後のニンニくりん茎は自発休眠状態にあり、環境条件にかかわらず、芽、根は伸長しにくい状態にあるが、自発休眠の覚醒が進むと、芽、根の伸長は次第に他発休眠に依存するようになる。すなわち、収穫後のりん茎の芽、根の伸長には自発休眠と他発休眠の両方が関係し、最も重要な環境条件である温度は、自発休眠への影響と他発休眠への影響という2面から、芽、根の伸長に関わる。従って、貯蔵中のニンニくりん茎の芽、根の動きを理解するには、自発休眠と他発休眠の両方に対する温度の影響を解明することが必要である。

園芸作物の貯蔵性と呼吸速度との間には密接な関係があり、一般に、呼吸速度が低いほど貯蔵可能期間は長くなる。温度条件は植物の呼吸速度を決定する重要な要素であり、通常、呼吸速度は温度が10℃上昇する毎に2～3倍に増加する (Hardenburg *et al.* 1986)。しかし、0℃～20℃で貯蔵したニンニクリ

ん茎の呼吸速度は10℃で最も高いことが報告されており (Mann・Lewis 1956)、ニンニクは呼吸に関して特異な温度反応性をもつ可能性が示されている。

薬剤に依存しないニンニクの周年供給システムを確立するには、品質保持技術の開発が必要である。ニンニクの貯蔵特性を理解することは品質保持技術開発の基本となることから、本報告では、りん茎の自発休眠、他発休眠および呼吸速度に及ぼす収穫後の温度条件の影響を広範囲な条件において調査した。これまでに、Mann・Lewis (1956) および高樹 (1979) は、ニンニくりん茎の芽、根の伸長と温度との関係に関して詳細な研究を行っている。しかし、彼らの試験は、りん茎を次作の種球に利用する場合に最適な貯蔵条件を見出すことを主な目的としており、側球を培地に植え付けた後の芽、根の生長に焦点が当てられている。これに対して、著者らの最終的な目標は、周年出荷のための品質保持技術の開発であり、本試験では、植え付け後ではなく、貯蔵中の芽、根の伸長に注目した。

II 材料と方法

1. 材料および共通の調査方法

すべての試験に青森県産業技術センター野菜研究所内の圃場で栽培したニンニク「福地ホホワイト」のりん茎を使用した。

種子、芽、球根などの休眠に関する多くの報告では、これらの休眠器官の自発休眠の深さを発芽 (萌芽) に最適な環境条件に置いた場合の発芽 (萌芽) のしにくさによって評価している (Le Page-Degivry・Garello 1992、Suttle・Hultstrand 1994、高樹 1979、田村ら 1993)。一方、タマネギやニンニクの休眠研究では、休眠の深さを貯蔵中のりん茎の芽の伸長をもとに評価し、芽の伸長が停止している期間を休眠期としているものもある (青葉 1954a、田中ら 1985、Vázquez-Barrios *et al.* 2006)。深い自発休眠状態にある植物の生長は、最適な環境条件下でも一時的に停止するという考え (Lang *et al.* 1987) に従うと、後者の方法は萌芽に必要な環境要素である水が制限されており、自発休眠の評価法としては

不適切と考えられる。従って、本報告では、前者の方法を採用し、ニンニクの自発休眠の深さを評価した。具体的には、ニンニク側球を湿ったパーミキュライトに植え付け、20℃、暗黒条件に置いて萌芽日を調査し、植え付けから萌芽までに要する日数（＝萌芽日数）によって自発休眠の深さを評価した。

芽の伸長は、萌芽葉長を側球長で割った値である萌芽程度によって評価した。根の伸長は発根程度により評価し、発根程度は0～5の6段階評価（0：未発根、1：未突出、痕跡程度、2：根長1mm以下、3：根長1～2.5mm、4：根長2.5～5mm、5：根長5mm以上）とした。

2. 収穫前後における自発休眠および芽、根の伸長の推移（試験1）

青森県産業技術センター野菜研究所内の圃場で栽培したニンニク「福地ホワイト」のりん茎を2003年7月1日に収穫した。葉と根を切除後、りん茎を格子状のコンテナに入れ、3週間の乾燥処理を行った。乾燥条件は、昼間（約10時間）は設定温度35℃で加温・通風し、夜間（約14時間）は無加温で、通風のみとした（以後、この方法を強制乾燥と呼ぶ）。乾燥終了後、りん茎をダンボール箱に入れ、室温条件で貯蔵した。収穫1か月前の2003年6月1日から約3か月後の10月9日まで、りん茎の自発休眠の深さ、芽、根の伸長および貯蔵葉内部の分化葉数を経時的に調査した。貯蔵葉内部の分化葉数は実体顕微鏡を用いて調査した。各調査日に9個のりん茎を側球に分解し、それらの中から自発休眠の調査には16側球、芽、根の伸長および分化葉数の調査にはそれぞれ10側球を供試した。収穫前の2回の調査（6月1日、6月15日）には、調査当日に圃場で生育中の株を掘り上げ、これを供試した。

3. 乾燥条件が自発休眠および芽、根の伸長に及ぼす影響（試験2）

試験1と同日に収穫し、葉と根を切除したニンニクリン茎を遮光率約75%条件の無加温のガラス室に3週間置いて乾燥させた（＝自然乾燥）。乾燥終了後、りん茎をダンボール箱に入れ、試験1と同じ室温条件で貯蔵した。試験1の調査日と重複する7月22日、8月11日、9月1日、9月22日に自発休眠の深さおよび芽、根の伸長を調査し、強制乾燥（試験1）と自然乾燥（試験2）の影響を比較した。各調査日に6個のりん茎を側球に分割し、自発休眠の調査には16側球を、芽、根の伸長調査には10側

球を供試した。

4. 自発休眠に及ぼす温度の影響（試験3）

2008年7月3日に掘り上げ、葉と根を切除したりん茎を8日間の予備乾燥後（23℃、暗黒条件）、3週間の温度処理（-0.5℃～35℃の9水準、暗黒条件、湿度未制御）を行った。予備乾燥は、収穫直後のりん茎が氷点下の温度処理により凍結するのを回避するために行い、自発休眠の覚醒効果が低いと予想される条件（23℃、暗黒条件）を選択した。温度処理終了後、りん茎の自発休眠の深さ、芽、根の伸長およびりん片（側球から保護葉を除いた可食部）の水分含量を調査した。処理区当たり10個のりん茎を側球に分割し、自発休眠の調査には16側球を、芽、根の伸長調査には10側球を、水分含量調査には8側球を供試した。

5. 芽、根の伸長に及ぼす貯蔵温度の影響（試験4）

2003年7月1日に掘り上げ、葉と根を切除したりん茎を格子状のコンテナに入れ、試験1と同じ条件で3週間の強制乾燥処理を行った。乾燥終了後のりん茎をダンボール箱に入れ、異なる温度条件（-2.5℃～35℃の8水準、暗黒条件、湿度未制御）で貯蔵し、貯蔵3、6、9週後に芽、根の伸長を調査した。1回の調査につき、処理区当たり5個のりん茎を側球に分割し、10側球（2側球/りん茎）を供試した。

6. 呼吸速度に及ぼす温度の影響

1) -2.5℃～35℃条件での呼吸速度（試験5）

試験4と同じ条件で収穫、乾燥、貯蔵したりん茎を供試した。9週間の貯蔵期間中、りん茎の呼吸速度を以下に示す方法で1～2週間隔で測定した。りん茎を容積500mLのポリエチレン製容器に入れて密封し（1個/容器）、各貯蔵条件に6時間置いた後、容器のヘッドスペースガスに含まれる二酸化炭素濃度をTCD検出器付きガスクロマトグラフィー（GC-14B、島津製作所）で測定した。-2.5℃条件では、例外的に、密封時間を50時間とした。測定終了後、りん茎を容器から取り出し、貯蔵を継続し、測定には毎回同じりん茎を供試した。ガスクロマトグラフィー分析では、活性炭60/80メッシュ（島津製作所）を充填したステンレスカラム（内径3mm、長さ2m）を使用し、カラムオープン温度は120℃、検出器温度は150℃とした。キャリアガスにはヘリウムを使用し、流量は60ml/分とした。処理区当たり4個のりん茎を供試した。

2) 32℃～41℃条件での呼吸速度 (試験6)

2004年7月1日に収穫し、葉と根を切除したりん茎を試験1と同じ条件で24日間強制乾燥した。乾燥終了後、りん茎をダンボール箱に入れ、32℃、35℃、38℃、41℃で9週間貯蔵し(暗黒条件、湿度未制御)、りん茎の呼吸速度を上記と同じ方法で1～2週間隔で測定した。処理区当たり4個のりん茎を供試した。

3) TTC還元力 (試験7)

2, 3, 5-トリフェニルテトラゾリウムクロライド(TTC)還元力は、呼吸反応のひとつであるクエン酸回路の脱水素反応に関わる酵素活性の指標となる。ここでは、ニンニクの呼吸と温度との関係をさらに解明するため、異なる温度で貯蔵したりん茎のTTC還元力を調査した。

試験4と同じ条件で収穫、乾燥、貯蔵したりん茎を供試した。貯蔵6週後に貯蔵葉中のTTC還元力を以下の方法で測定した。細かく切った貯蔵葉(fw約1.5g)を試験管に入れ、0.4% TTC溶液と0.1Mリン酸緩衝緩液(pH 7.0)の等量混合液5mLを加え、37℃、暗黒条件に置いた。2時間後、2Nの硫酸1mLを加えて反応を止め、切片表面の水分を除いた後、切片を乳鉢に移し、少量の石英砂と酢酸エチルを加えて摩砕した。生成したトリフェニルフォルマザンを酢酸エチルで抽出し(2mL×3回)、抽出液の吸光度(485nm)を分光光度計で測定した。反復数は4とした。

4) 収穫後の呼吸速度の変化 (試験8)

2003年7月1日に収穫し、葉と根を切除したニンニクリん茎を5℃、15℃、25℃条件(暗黒条件、湿度未制御)に置いた。りん茎の呼吸速度を試験5と同じ方法で収穫6週間後まで毎週測定した。収穫0週後の測定は温度処理開始1日後に行った。処理区当たり4個のりん茎を供試した。

Ⅲ 結 果

1. 収穫前後における自発休眠および芽、根の伸長の推移 (試験1)

強制乾燥中の日最高、日平均、日最低温度の平均は、それぞれ33.9℃、28.1℃、22.3℃であった。貯蔵中の日平均温度は、25℃を超えた8月上旬の数日を除いて、貯蔵開始から9月中旬までは20℃～25℃の範囲で、9月下旬以降は12℃～21℃の範囲で推移した(図1)。貯蔵全期間の平均温度は

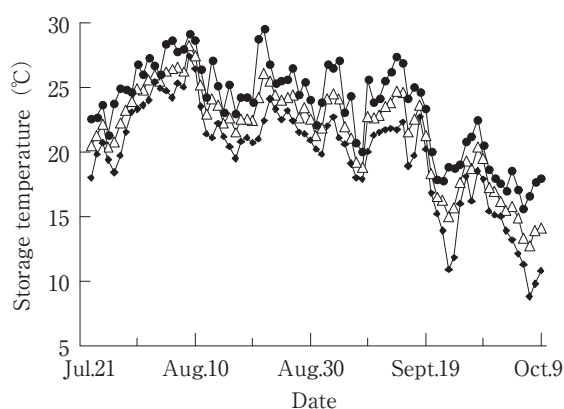


Fig. 1 Changes in daily maximum (●), mean (△) and minimum (◆) temperatures during the bulb storage.

21.7℃であった。

自発休眠の指標となる萌芽日数は収穫1か月前の6月1日時点で最も長く(142日)、その後は減少を続け、9月1日には11日となった(図2A)。萌芽日数は乾燥開始時(7月1日)の100日から乾燥終了時(7月22日)の45日へと、強制乾燥の前後で顕著に減少した。萌芽程度は8月11日までは0.25以下の低い水準で推移したが、8月21日以降増加し、10月9日には0.92に達した(図2B)。発根程度も8月11日までは低い水準で推移したが、8月21日から顕著な増加がみられた(図2C)。すなわち、芽(図2B)、根(図2C)の伸長は収穫の前後には停止し、収穫の約1.5か月後の8月中旬頃に始まるという類似のパターンを示した。貯蔵葉内部の葉の分化は収穫直後から停止し、芽、根の伸長開始よりやや遅れて9月上旬に再開した(図2D)。

2. 乾燥条件が自発休眠および芽、根の伸長に及ぼす影響 (試験2)

自然乾燥中の日最高、日平均、日最低温度の平均は、それぞれ27.5℃、22.5℃、18.9℃であり、試験1の強制乾燥中の温度条件に比べて、日平均温度で5.6℃低かった(表1)。いずれの調査時期でも、萌

Table 1 Average of daily maximum, mean and minimum temperatures during forced curing and natural curing for 3 weeks.

Curing type	Temperature (°C)		
	Maximum	Mean	Minimum
Forced curing	33.9	28.1	22.3
Natural curing	27.5	22.5	18.9

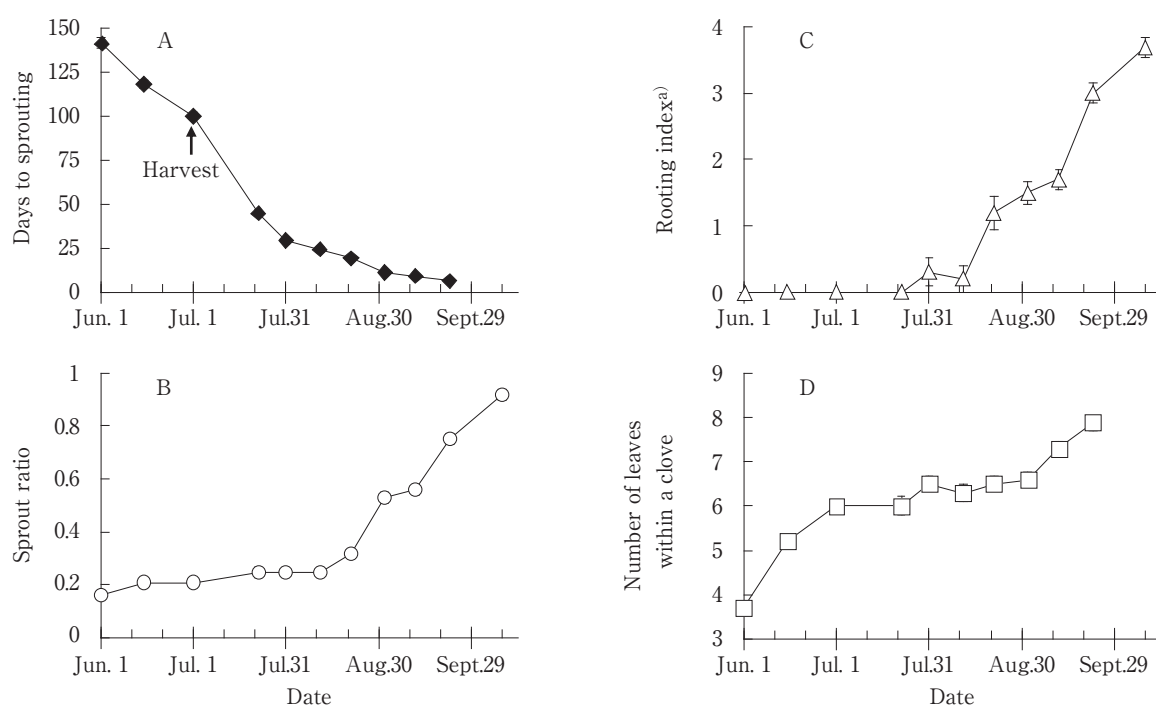


Fig. 2 Changes in the depth of endodormancy (A), sprout growth (B), root growth (C) and the number of leaves differentiated within a clove (D) of garlic bulbs.

Bulbs were harvested on July 1, and forcibly cured for 3 weeks, and then stored at natural temperature from July 22 to Oct 9. ^{a)}Rooting index 0 = no rooting, 1 = trace, 2 = root length less than 1mm, 3 = root length 1–2.5 mm, 4 = root length 2.5–5mm, 5 = root length more than 5mm. Data are means \pm SE of 16 (A) and 10 (B, C, D) replications, respectively. The SE is within the data point if not shown.

芽日数は強制乾燥区に比べて自然乾燥区で長く (図 3 A)、自然乾燥したりん茎では強制乾燥したりん茎に比べて自発休眠の覚醒がゆっくりと進行した。自然乾燥したりん茎は強制乾燥したりん茎に比べて貯蔵中の芽、根の伸長も遅かった (図 3 BC)。

3. 自発休眠に及ぼす温度の影響 (試験 3)

いずれの処理区でも温度処理終了時点の発根程度は 0、萌芽程度は 0.4 以下であり (表 2)、温度処理中の芽、根の伸長はほとんどなかった。また、温度処理終了時点のりん片の水分含量は、いずれの処理区でも約 60% であり、りん片の水分含量に処理温度による違いはみられなかった (表 2)。萌芽日数と処理温度との関係を見ると (図 4)、 -0.5°C ～ 5°C の範囲では萌芽日数は温度上昇とともに低下したが、 5°C ～ 15°C の範囲では温度上昇とともに増加し、 15°C ～ 35°C の範囲では再び温度上昇とともに低下した。萌芽日数は -0.5°C 区および 15°C 区で最も長く (101 日)、 35°C 区で最も短かった (48 日)。これらの結果から、萌芽日数の長い -0.5°C および 15°C 条件は、自発休を維持する効果が高いことが示され

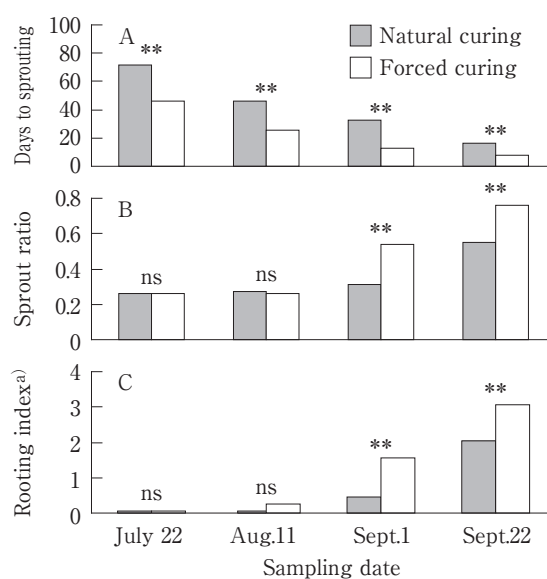


Fig. 3 Effects of curing condition on the depth of endodormancy (A), sprout growth (B) and root growth (C) of stored garlic bulbs.

Harvested bulbs were naturally or forcibly cured for 3 weeks, and then stored at natural temperature from July 22. ^{a)}See fig. 2. ns, ** Means at each sampling date are not significantly or significantly different at the 1% level by *t*-test (A, B) or by *U*-test (C), respectively.

た。これに対して、萌芽日数の短い25℃以上の条件は自発休眠を覚醒する効果が高く、その効果は処理温度が高いほど高いことが示された。なお、-0.5℃区において凍結の発生はみられなかった。

4. 芽、根の伸長に及ぼす貯蔵温度の影響 (試験4)

貯蔵3、6、9週後の萌芽程度は、15℃区で最も高く、これより高温および低温になるほど低下した (図5A)。貯蔵3、6、9週後の発根程度は、10℃区で最も高い傾向がみられ、これより高温および低温になるほど低下した (図5B)。9週間の貯蔵期間中、-2.5℃および35℃区では芽、根の伸長はほぼ完全に停止した。なお、-2.5℃区で凍結の発生はみられなかった。

緒言で述べたように、貯蔵中の芽、根の伸長には自発休眠と他発休眠の両方が影響するが、本試験で

は、貯蔵処理開始時 (= 3週間の強制乾燥後) に、自発休眠はすでにより覚醒した状態にあったことから (図2A)、各貯蔵処理区における芽、根の伸長は、それぞれの貯蔵温度が他発休眠に及ぼす影響を強く反映していると考えられた。従って、芽、根の伸長が最も強く抑制された-2.5℃および35℃条件は、他発休眠を維持する効果が最も高く、逆に、芽、根の伸長が最も促進された10℃~15℃条件は、他発休眠の維持効果が最も低いと考えられた。

5. 呼吸速度に及ぼす温度の影響

1) -2.5℃~41℃条件での呼吸速度 (試験5、6)

-2.5℃~35℃の貯蔵条件では (試験5)、りん茎の呼吸速度は-2.5℃区で極めて低く、10℃、15℃、20℃区の呼吸速度は、これらの温度より低温の5℃区および高温の25℃、30℃、35℃区の呼吸速度より高く推移した (図6)。9週間の貯蔵期間中、いずれの温度条件でも呼吸速度に大きな変化はなく安定した状態で推移した (図6)。32℃~41℃の貯蔵条件では (試験6)、りん茎の呼吸速度は32℃区で最も低く、貯蔵温度が上昇するほど増加し

Table 2 Bud and root growth and water content of scales of garlic bulbs at the end of temperature treatment for 3 weeks.

Temperature (°C)	Root index ^{a)}	Sprout ratio	Water content of scale (%)
-0.5	0	0.35 ± 0.02 ^{b)}	60.4 ± 0.6 ^{b)}
2	0	0.34 ± 0.01	61.0 ± 0.6
5	0	0.33 ± 0.01	60.1 ± 0.6
10	0	0.40 ± 0.02	60.9 ± 0.2
15	0	0.32 ± 0.01	61.2 ± 0.3
20	0	0.33 ± 0.02	60.2 ± 0.5
25	0	0.33 ± 0.02	60.6 ± 0.6
30	0	0.34 ± 0.02	60.8 ± 0.7
35	0	0.35 ± 0.02	60.1 ± 0.5

a) See fig. 2. b) SE

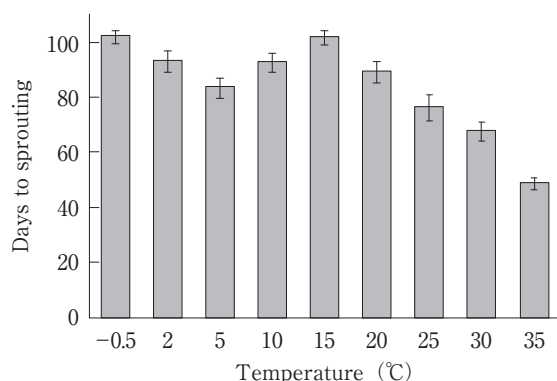


Fig. 4 Effects of temperature on the depth of endodormancy of garlic bulbs.

Bulbs were exposed at different temperatures for 3 weeks just after harvest. Data are means ± SE of 16 replications.

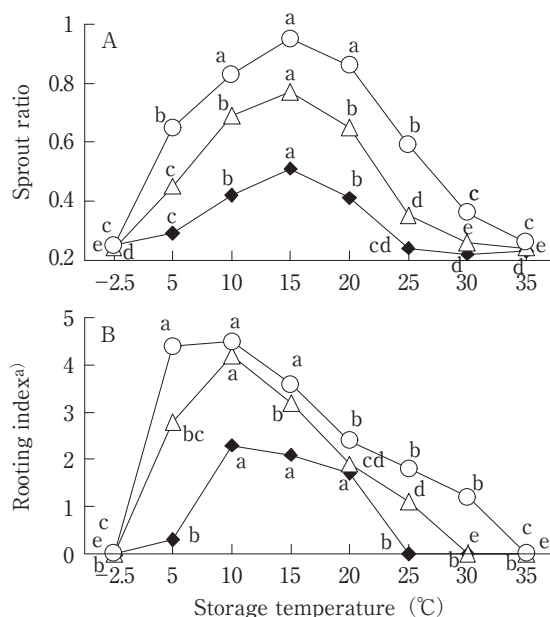


Fig. 5 Effects of storage temperature on sprout growth (A) and root growth (B) of garlic bulbs stored for 3 (◆), 6 (△) and 9 (○) weeks.

a) See fig. 2. Mean separation within the same storage period by Tukey-Kramer's multiple range test (A) or Steel-Dwass's multiple range test (B) at the 5% level, respectively

た (図 7)。9 週間の貯蔵期間中、32℃、35℃、38℃区の呼吸速度は一定に保たれたが、41℃区の呼吸速度は貯蔵 6 週後に一時的に上昇し、その後、急速に低下した (図 7)。41℃で 6 週間以上貯蔵したりん茎には、貯蔵葉の変色、壊死が発生した。38℃以下で貯蔵したりん茎にはこのような症状はみられなかった。試験 5、6 の結果を総合し、貯蔵 4 週後

のりん茎の呼吸速度と貯蔵温度との関係を図 8 に示した。呼吸速度は 10℃までは温度の上昇とともに増加し、10℃～20℃の範囲ではほぼ一定に保たれた。20℃を超えると呼吸速度は温度上昇とともに低下し、30℃付近で低下のピークに達した。35℃以上では呼吸速度は再び温度上昇とともに増加し、特に、38℃を超えると著しい増加がみられた。

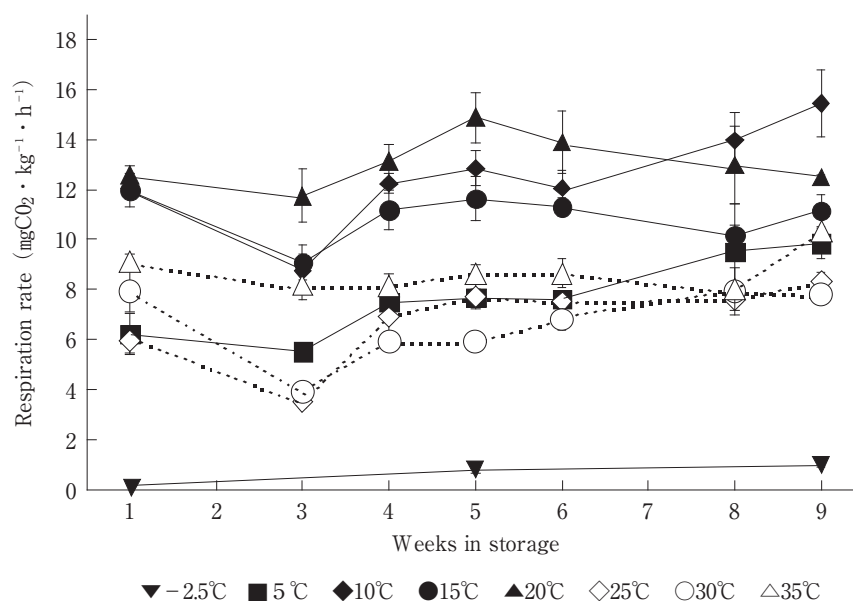


Fig. 6 Changes in the respiration rate of garlic bulbs during 9-week storage at various temperatures between -2.5°C and 35°C .

Data are means \pm SE ($n=4$). The SE is within the data point if not shown.

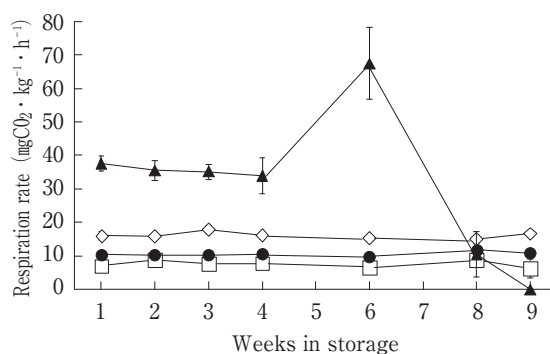


Fig. 7 Changes in the respiration rate of garlic bulbs during 9-week storage at 32°C (\square), 35°C (\bullet), 38°C (\diamond) and 41°C (\blacktriangle). Data are means \pm SE ($n=4$).

The SE is within the data point if not shown.

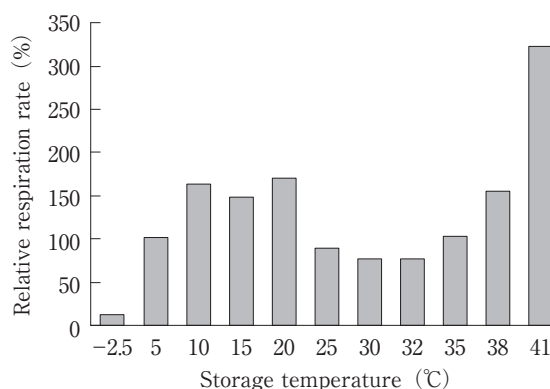


Fig. 8 Relationship between storage temperature and the respiration rate of garlic bulb after 4 weeks in storage.

The respiration rate in storage at 35°C is regarded as 100%. A value at -2.5°C is the respiration rate after 5 weeks in storage.

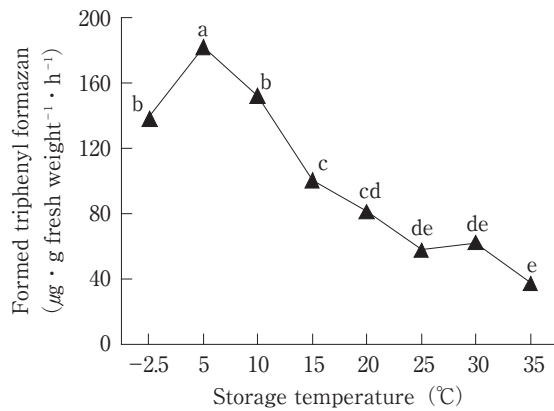


Fig. 9 TTC-reducing ability of storage leaves of garlic bulbs stored at various temperatures for 6 weeks.

Mean separation by Tukey-Kramer's multiple range at the 5% level.

2) TTC 還元力 (試験7)

異なる温度条件で6週間貯蔵したりん茎の貯蔵葉中のTTC還元力を図9に示した。TTC還元力は5℃区で最も高く、次いで、-2.5℃および10℃区で高かった。5℃～35℃の範囲では、TTC還元力は貯蔵温度が高くなるほど低下する傾向がみられた。最も低かった35℃区のTTC還元力は5℃区の約20%の値であった。

3) 収穫後の呼吸速度の変化 (試験8)

収穫0週後(1日後)のりん茎では、25℃区の呼吸速度は15℃区の約2倍、5℃区の約6倍高く(図10)、収穫後間もないりん茎では、呼吸速度は温度上昇とともに高まるという一般的な温度反応を示した。いずれの温度条件でも、収穫後、りん茎の呼吸速度は低下し、収穫3週後以降は、一定の低いレベルで推移した(図10)。呼吸速度の低下は25℃区で最も激しく、5℃区で最も穏やかであった。呼吸速度が安定した収穫4週後以降の呼吸速度は、25℃区で低く、15℃区で高い傾向にあった。

IV 考 察

ニンニクやタマネギなどの休眠研究では、りん茎の休眠は収穫時点で最も深い状態にあると考えられることもあるが(緒方 1952, Vázquez-Barrios *et al.* 2006)、試験1において、萌芽日数は収穫1か月前の6月1日時点で最も長く、それ以後、減少を続けたことから(図2A)、ニンニクの自発休眠は収穫

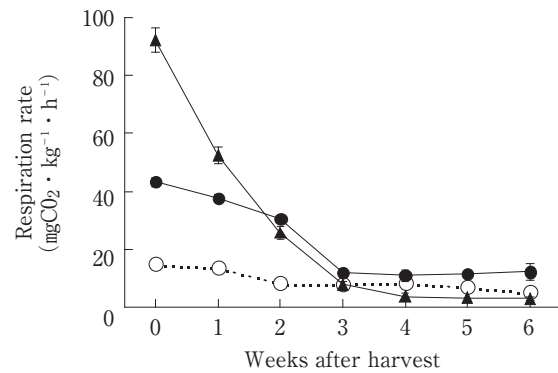


Fig. 10 Changes in the respiration rate of garlic bulbs after harvest. Just after harvest, bulbs were placed at 5℃ (○), 15℃ (●) and 25℃ (▲) for 6 weeks.

Data are means ± SE (n=4). The SE is within the data point if not shown.

時点ですでに覚醒の途上にあると考えられた。自発休眠の最深期は今回の試験では特定できなかったが、同じネギ属のワケギでは、りん茎の自発休眠の最深期は、りん葉(=大部分が葉鞘から成るりん茎形成期に特有の葉)分化の約半月後であること(Yamazaki *et al.* 1995, 山崎 2003)、また、供試したニンニクのりん葉分化期は4月下旬であることから、ニンニクの自発休眠の最深期は5月中旬頃と推定された。

萌芽日数の変化から(図2A)、収穫時にすでに覚醒途上にあったニンニクの自発休眠は、収穫後の強制乾燥処理により覚醒が一段と進行し、8月中旬頃に完全に覚醒状態になると考えられた。自発休眠の覚醒効果は、自然乾燥に比べて強制乾燥で高く(図3)、その原因を明らかにするため、試験3では広範囲の温度処理が自発休眠の覚醒に及ぼす影響を調査した。その結果、15℃～35℃の範囲では、自発休眠の覚醒効果は処理温度が高いほど高いことが示され(図4)、自然乾燥(平均温度22.5℃)と強制乾燥(平均温度28.5℃)の温度条件の違いが、両者の覚醒効果が異なる主要な原因であると考えられた。試験3において、ニンニクの自発休眠の覚醒には5℃前後の低温と25℃以上の高温が促進的に作用することが示されたが(図4)、この結果は、ニンニクの5℃～10℃貯蔵あるいは35℃貯蔵が植え付け後の萌芽・発根を促進するというこれまでの報告(Mann・Lewis 1956, 高樹 1987)と矛盾しない。

Table 3 Effect of temperature on maintenance of endodormancy and ecodormancy of garlic bulbs.

Dormancy type	Temperature (°C)									
	-2.5	-0.5	2	5	10	15	20	25	30	35
Endodormancy	- a)	◎	○	△	○	◎	○	△	×	××
Ecodormancy	◎	-	-	×	××	××	×	△	○	◎

Each symbol represents relative effectiveness of temperature on maintenance of the two types of dormancy.

◎very strong, ○strong, △moderate, ×weak, ××very weak.

a) not examined.

りん茎に対する高温処理がその後の萌芽を促進することは、タマネギ（青葉 1954b、Miedema・Kamminga 1994）やワケギ（長谷川ら 1981）でも報告されており、高温による自発休眠の覚醒効果は、春から初夏に長日条件でりん茎を形成するネギ属植物に共通の性質であるのかもしれない。

試験3、4の結果をもとに、ニンニクの自発休眠および他発休眠に及ぼす温度の影響を表3にまとめた。ここで興味深いのは、自発休眠の維持と他発休眠の維持に対して正反対に働く温度が存在することである。例えば、15℃前後の涼温は自発休眠の維持には最も有効であるが、他発休眠の維持には最も効果が低い。また、30℃以上の高温は自発休眠に対しては覚醒促進に働くが、他発休眠に対しては強い維持作用をもつ。収穫後のニンニクリン茎の芽、根の伸長には自発休眠と他発休眠の両方が関係することから、ある温度がこれら2つの休眠に対して正反対に働くということは、その温度が芽、根の伸長に及ぼす影響は、温度遭遇の時期や期間によって大きく変化することを意味する。例えば、収穫直後の高温処理は自発休眠の覚醒を促進するため、その後、りん茎が常温に置かれた場合には、芽、根の伸長促進に働くと考えられる。一方で、自発休眠の覚醒が完了する8月中旬以降の高温処理は、他発休眠の状態を維持することにより、芽、根の伸長抑制に作用すると考えられる。岩瀬（2004）は、10月出荷用ニンニクの萌芽・発根抑制法として、9月上旬からの2週間の38℃処理を提案しているが、この方法は高温による他発休眠の維持効果を利用したものと考えられる。また、青葉（1954b）は、タマネギでも高温が処理時期によって芽の伸長促進に働く場合と伸長抑制に働く場合があることを報告している。青葉（1954b）はこの現象の理由には言及していないが、ニンニクと同様に、タマネギでも高温は自発休眠の覚醒と他発休眠の維持という2つの作用をもつ

結果ではないかと推定される。

Mann・Lewis（1956）が特異な温度反応をもつ可能性を示唆したニンニクの呼吸特性の詳細を明らかにするため、本報告では広範囲な温度条件（-2.5℃～41℃）において呼吸速度の調査を行った。その結果、貯蔵中のりん茎の呼吸速度は10℃～30℃の範囲では温度上昇に伴って増加せず、ニンニクは涼温条件（10℃～20℃）より高温条件（25℃～35℃）で呼吸速度が低いという特異な特性をもつことが明らかになった（図8）。そして、このような呼吸特性は、収穫後の呼吸速度の調査から（図10）、収穫後約3週間の間に獲得されることが示された。一般的な園芸作物とは異なり、長期貯蔵においてニンニクの品質は涼温条件（20℃）よりも高温条件（30℃）で良好に維持されるが（Vázquez-Barrios *et al.* 2006）、これは高温条件がもつ強い他発休眠の維持効果と高温条件での低い呼吸速度に起因するものと考えられる。

ニンニクの呼吸特性は大部分の園芸作物とは全く異なるが、ダッチアイリスはニンニクと類似した呼吸特性をもつ。Kamerbeek（1962）は、ダッチアイリスりん茎の呼吸速度は収穫直後には温度上昇とともに増加すること、その後、呼吸速度は急激に低下し、約3週間で安定状態に達すること、安定状態での呼吸速度は20℃条件より30℃条件の方が低いことなどを報告している。Kamerbeek（1962）は、ダッチアイリスの呼吸速度が高温条件で低く維持される原因をりん茎内部の酸素分圧、組織の水分状態、呼吸基質となる糖濃度などに求めたが、それらの仮説はいずれも否定され、原因を特定することはできなかった。一方、本報告では、ニンニクリン茎の高温条件での呼吸抑制の原因に関して、興味深い知見が得られた。試験7において、異なる温度条件で6週間貯蔵したニンニクリン茎の貯蔵葉のTTC還元力を調査したところ、5℃～35℃の範囲では

TTC還元力は貯蔵温度が上昇するほど低下した(図9)。TTCは複数の脱水素酵素によって還元される性質を有し(Jensen *et al.* 1951)、TTC還元力は呼吸反応のひとつであるクエン酸回路の脱水素反応に関わる酵素活性の指標となることから、種子、根などの様々な組織の活力検定に広く利用されている。試験7の結果は、高温貯蔵したニンニクでは、クエン酸回路の脱水素酵素活性が著しく低下することを示しており、このことが高温条件での低い呼吸速度の一因である可能性が考えられる。

タマネギでは、貯蔵りん茎の芽の伸長開始時期と呼吸速度の増加時期がほぼ一致し、呼吸速度が芽の伸長あるいは休眠状態の指標となる可能性が示唆されている(緒方、1952; 田中ら、1985)。そこで、ニンニクについてもこの可能性を検討してみると、9週間の貯蔵期間中、いずれの温度条件でもりん茎の呼吸速度は、芽の伸長程度に関係なく、大きな変化を示さなかった(図5A、図6)。著者らの行った別の試験では、貯蔵したりん茎の安定した呼吸状態は少なくとも20週間維持され、呼吸速度の増加はりん茎が腐敗した場合にのみ認められた(山崎ら、2003)。また、Pyo・Lee (1973)は、ニンニクリん茎を室温で8か月間貯蔵した場合、芽は伸長するが、呼吸速度は安定した状態で維持されることを報告している。以上のように、ニンニクでは芽の伸長に関連した呼吸速度の増加はみられず、呼吸速度が貯蔵中の芽の伸長の指標となる可能性は否定された。

本報告で得られた結果をもとに、品質保持に適するニンニクの乾燥および貯蔵条件について考察する。周年出荷用のニンニクリん茎では、収穫後の乾燥は貯蔵性を高めるために不可欠な過程であり、青森県のニンニク産地では、盤茎(=ニンニクの短縮した茎)の水分含量が収穫時の約80%から20%以下に低下するまで乾燥が行われる。約35℃で3~4週間の連続乾燥が一般的な乾燥条件であり、乾燥期間中にりん茎重は収穫時の7割程度にまで低下する。理想的な乾燥温度とは、りん茎を効率的に乾燥できる温度であるとともに、萌芽・発根抑制の観点からみると、乾燥終了時に自発休眠をより多く維持できる温度といえるが、現行の乾燥温度(約35℃)は自発休眠の覚醒作用が最も高い条件であり(表3、図4)、品質保持に最適な温度ではない可能性が高い。著者らは、35℃条件より自発休眠の維持効果の高い25℃~30℃条件が乾燥温度として望ましいと考えて

おり、この仮説を検証し、品質保持に最も適した乾燥条件を提示することが、今後の課題である。

貯蔵条件としては、他発休眠の維持効果の高い氷点下条件と35℃前後の高温条件があげられる。このうち、高温条件は自発休眠の覚醒を促進する効果が高いため、高温から常温条件に移動後に芽、根の伸長を促進する可能性がある。これに対して、氷点下条件は自発休眠と他発休眠の両方に対して高い維持効果をもつ(表3)。従って、貯蔵温度としては高温条件より氷点下条件の方が有利であり、ニンニク産地の農協等で行われる整備された施設を利用した大規模な貯蔵には、氷点下貯蔵が適すると考えられる。

萌芽抑制剤に依存しないニンニクの周年出荷システムの確立には、最適な氷点下貯蔵温度の選定が大きな課題となる。米国農務省の園芸作物の貯蔵に関するハンドブック(Hardenburg *et al.* 1986)では、ニンニクの最高凍結温度は-0.8℃、貯蔵適温は0℃となっている。一方、高樹(1979)は、貯蔵前に室温で1か月間乾燥させたニンニクでは、8か月間の-2.3℃貯蔵でも凍結はみられず、自発休眠状態が維持されることを報告している。ニンニクの凍結温度は品種や乾燥程度の影響を大きく受けると予想され、これらの条件が違えば貯蔵適温も異なると考えられる。従って、現行の国産ニンニクの周年出荷体系で利用する氷点下貯蔵温度を選定するには、主要品種を用い、生産現場の乾燥基準を満たした条件で貯蔵試験を実施する必要がある。また、本報告では、芽、根の伸長にのみ注目したが、ニンニクリん茎の品質には、外皮の色調、貯蔵葉表面のつや、病害やセンチュウ害の有無など複数の要素が関係するので、今後は、これらの要素に与える影響を総合的に検討し、実用的な乾燥および貯蔵条件の選定を行う予定である。

引用文献

- 1) 青葉 高. 1954a. 玉葱の肥大及び休眠に関する研究(第3報) 貯蔵中における萌芽過程について. 園学雑 24: 199-203.
- 2) 青葉 高. 1954b. 玉葱の肥大及び休眠に関する研究(第4報) 玉葱の萌芽に対する貯蔵温度の影響. 園学雑 24: 265-270.

- 3) El-Oksh, I. I.; Abdel-Kader, A. S.; Wally, Y. A.; El-Kholly, A. F. 1971. Comparative effects of gamma irradiation and maleic hydrazide on storage of garlic. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 96 : 637-640.
- 4) Hardenburg, R. E.; Watada, A. E.; Wang, C. Y. 1986. The commercial storage of fruits, vegetables, and florist and nursery stocks. United States Department of Agriculture. Agriculture Handbook Number 66. United States Government Printing Office, Washington, D.C. p.130
- 5) 長谷川 繁, 吉田隆徳, 沖森 当. 1981. ワケギの栽培学的研究 (第2報) 休眠覚醒に及ぼす高温処理の影響について. 広島県農試報 44 : 53-62.
- 6) Isenberg, F. M. R.; Thomas, T. H.; Pendergrass, M.; Abdel-Rahman, M. 1974. Hormone and histological differences between normal and maleic hydrazide treated onions stored over winter. Acta Hort. 38 : 95-125.
- 7) 岩瀬利己. 2004. 38℃加温処理が貯蔵中のニンニクの発根・萌芽に及ぼす影響. 東北農業研究 57 : 183-184.
- 8) Jensen, C. O.; Sacks, W.; Baldauskis, F. A. 1951. The reduction of triphenyltetrazolium chloride by dehydrogenases of corn embryos. Science 113 : 65-66.
- 9) Kamerbeek, G. A. 1962. Respiration of the iris bulb in relation to the temperature and the growth of the primordia. Acta Botanica Neerlandica 11 : 331-410.
- 10) Lang, G. A.; Early, J. D.; Martin, G. C.; Darnell, R. L. 1987. Endo-, para-, and ecodormancy: physiological terminology and classification for dormancy research. HortScience 22 : 371-377.
- 11) Le Page-Degivry, M. T.; Garelo, G. 1992. *In situ* abscisic acid synthesis. A requirement for induction of embryodormancy in *Helianthus annuus*. Plant Physiol. 98 : 1386-1390.
- 12) Mann, L. K.; Lewis, D. A. 1956. Rest and dormancy in garlic. Hilgardia (Journal of Agricultural Science Published by the California Agricultural Experiment Station) 26 : 161-189.
- 13) Miedema, P.; Kamminga, G. C. 1994. Bulb dormancy in onion. II. The role of cytokinins in high-temperature imposed sprout inhibition. Journal of Horticultural Science 69 : 41-45.
- 14) 緒方邦安. 1952. 生鮮農産食品の貯蔵に関する研究 (第4報) 葱頭の貯蔵に関する研究Ⅱ葱頭りん茎の大小と貯蔵性並びに貯蔵期間中に於ける代謝作用. 園学雑 21 : 29-36.
- 15) Pyo, H. K.; Lee, B. Y. 1973. A physiological and ecological study on the postharvest garlics. J. Kor. Soc. Hort. Sci. 14 : 25-30.
- 16) Suttle, J. C.; Hultstrand, J. F. 1994. Role of endogenous abscisic acid in potato microtuber dormancy. Plant Physiol. 105 : 891-896.
- 17) 高樹英明. 1979. ニンニクの球形成と休眠に関する研究. 山形大学紀要 (農学) 8 : 507-599.
- 18) 高樹英明. 1987. ニンニク球の植え付け後の発根と根の生長に及ぼす球の貯蔵温度と植え付け温度の影響. 山形農林学会報 44 : 51-55.
- 19) 田村文男, 田辺賢二, 池田隆政. 1993. ニホンナシ '二十世紀' の芽の休眠の深さとABAとの関係. 園学雑 62 : 75-81.
- 20) 田中征勝, 池 光鉉, 小餅昭二. 1985. 春まきタマネギの貯蔵に関する研究 (第1報) タマネギの萌芽に及ぼす貯蔵温度, 湿度の影響. 北海道農試研報 141 : 1-16.
- 21) Vázquez-Barrios, M. E.; López-Echevarría, G.; Mercado-Silva, E.; Castaño-Tostado, E.; León-González, F. 2006. Study and prediction of quality changes in garlic cv. Parla (*Allium sativum* L.) stored at different temperatures. Scientia Horticulturae 108 : 127-132.
- 22) 山崎博子. 2003. ワケギのりん茎形成制御およびりん茎形成・休眠の生理機構に関する研究. 野菜茶研研報 2 : 139-211.
- 23) 山崎博子, 濱野 恵, 本多一郎. 2003. 休眠覚醒過程におけるニンニクリン茎のアブシジン酸濃度, 呼吸速度およびTTC還元力の変化. 園学雑 72 (別2) : 180.
- 24) Yamazaki, H.; Nishijima, T.; Koshioka, M. 1995. Changes in abscisic acid content and water status in bulbs of *Allium wakegi* Araki throughout the year. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 64 : 589-598.